Sekundäreffekte der kosmischen Ultrastrahlung

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung der Doktorwürde
einer Hohen Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Eberhard-Karls-Universität
zu Tübingen
vorgelegt

von

Erwin Fünfer

aus Tübingen.

1933

Dekan: Prof. Dr. E. Hennig.
Referent: Prof. Dr. H. Geiger.

Tag der mündlichen Prüfung: 20. Juli 1933.

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Sonderabdruck aus „Zeitschrift für Physik“ 83. Band. 1. und 2. Heft
VERLAG VON JULIUS SPRINGER, BERLIN
1933

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41550010_0021

Sekundäreffekte der kosmischen Ultrastrahlung.

Von **Erwin Fünfer** in Tübingen.

Mit 11 Abbildungen. (Eingegangen am 29. März 1933.)

Es wird mit Hilfe einer Koinzidenzanordnung von drei bzw. fünf Zählrohren Zahl, Durchdringungsfähigkeit und Absorptionskoeffizient der von der kosmischen Ultrastrahlung in Blei, Eisen und Aluminium ausgelösten Sekundärstrahlung untersucht. Auch eine Übergangskurve von Aluminium nach Blei wird mit Koinzidenzen aufgenommen. Die wesentlichen Ergebnisse sind in § 8 zusammengefaßt.

§ 1. Einleitung. Vor etwa 2 Jahren hat Rossi[1]) gezeigt, daß die kosmischen Ultrastrahlen in Blei Sekundärstrahlen erzeugen, die fähig sind, Koinzidenzen hervorzurufen. Über Natur und Durchdringungsfähigkeit dieser neugebildeten Korpuskeln konnte jedoch aus diesen Versuchen nichts ausgesagt werden. Fast gleichzeitig wies Geiger[2]) darauf hin, daß es nach Versuchen von Heidecke möglich ist, mit dem Zählrohr eine Sekundärstrahlung der Ultrastrahlung nachzuweisen. Wurde nämlich über ein Zählrohr eine Absorberschicht gebracht, die zum Teil aus Blei, zum Teil aus Aluminium bestand, so ergaben sich Unterschiede in der Zahl der Zählrohrimpulse, wenn die Reihenfolge der beiden Absorberschichten, die die Ultrastrahlung zu durchsetzen hatte, vertauscht wurde. Dies wurde als Ausbildung einer Sekundärstrahlung in dem Absorber gedeutet. Die Reichweite dieser Sekundärkorpuskeln in Aluminium ergab sich zu etwa 5 cm. Auch Schindler[3]) konnte mit Hilfe der Ionisationskammer feststellen, daß in dünnen Schichten absorbierender Materie eine sekundäre Strahlung ausgelöst wird, die bei schweren Elementen besonders ausgeprägt ist.

Zweck der vorliegenden Arbeit war es, diese Erscheinung näher zu untersuchen und es lag nahe, hierzu eine Koinzidenzmethode zu verwenden.

§ 2. Versuchsanordnung. Fig. 1 gibt die Anordnung der drei Zählrohre wieder, deren Dreifachkoinzidenzen als Funktion der Dicke des über die Zählrohre gebrachten Materials untersucht wurden. Die Zählrohre sind mit parallelen Achsen in Dreiecksform angeordnet. Sie besaßen eine wirksame Länge von 25 cm, einen Durchmesser von 3 cm und ergaben im Mittel

---

[1]) B. Rossi, ZS. f. Phys. **68**, 64, 1931.
[2]) H. Geiger, Proc. Roy. Soc. London (A) **132**, 334, 1931.
[3]) H. Schindler, ZS. f. Phys. **72**, 625, 1931.

je 200 Stöße pro Minute. Eine ähnliche Anordnung wurde schon von Heidecke[1]) verwendet und von Rossi[2]) erstmals zum Nachweis von Sekundärstrahlen der Ultrastrahlen benutzt.

Die Auszählung der Dreifachkoinzidenzen erfolgte mit einem Koinzidenzverstärker, dem das Doppelgitterprinzip von Bothe[3]), wie es von Mott-Smith[4]) auf Dreifachkoinzidenzen angewandt wurde, zugrundeliegt. Das Auflösungsvermögen dieses Verstärkers wurde nach der Formel

$$v = \sqrt{\frac{N}{4\, n_1\, n_2\, n_3}}$$

berechnet. Hierin bedeuten v das Auflösungsvermögen in Sekunden, N die Zahl der zufälligen Koinzidenzen, n_1, n_2 und n_3 die Ausschlagszahlen der drei Zählrohre pro Sekunde. Die Zahl der zufälligen Koinzidenzen, gemessen mit regellos auseinandergelegten Zählrohren, ergab sich zu etwa 1,2 pro Stunde und demnach das Auflösungsvermögen zu rund $1{,}4 \cdot 10^{-3}$ sec. Bei den ersten Versuchen war das Auflösungsvermögen allerdings etwas schlechter. Jedenfalls wurden aber die systematischen Koinzidenzen durch die zufälligen nicht wesentlich beeinflußt.

Für die folgenden Versuche wurden zwei Apparaturen hergestellt, die vollständig unabhängig voneinander arbeiteten. Sie waren unter einem Glasdach von etwa 0,3 cm Stärke so aufgestellt, daß die Ultrastrahlung in einem großen Raumwinkel ungehindert einfallen konnte.

§ 3. Die Sättigungskurven. Fig. 1 zeigt die Anordnung, die zur Messung der Sättigungskurven an Blei, Eisen und Aluminium verwendet wurde. Für die mit dieser Anordnung beobachteten Dreifachkoinzidenzen können, wie schon Street und Johnson[5]) hervorgehoben haben, drei verschiedene Sekundärprozesse (Gabelung, Mehrfachstrahl aus einem Atom, sukzessive Auslösung) einer primären Strahlung verantwortlich gemacht werden. Eine Entscheidung, inwieweit diese Möglichkeiten zutreffen, konnte aus den

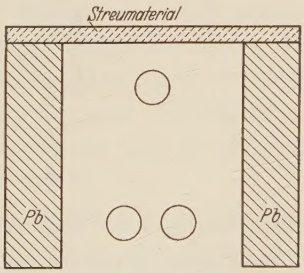

Fig. 1. Anordnung zur Messung der Sättigungskurven.

[1]) W. Heidecke, Tübinger Dissertation 1931.
[2]) B. Rossi, Phys. ZS. **33**, 304, 1932.
[3]) W. Bothe, ZS. f. Phys. **59**, 1, 1929.
[4]) L. M. Mott-Smith, Phys. Rev. **39**, 403, 1932.
[5]) J. C. Street u. Th. H. Johnson, Phys. Rev. **42**, 142, 1932.

folgenden Versuchen nicht getroffen werden. Sie zeigen nämlich, daß wahrscheinlich die Streuung der Sekundärstrahlen in der Materie erheblich ist, wodurch eine Diskussion des Auslösevorgangs sehr erschwert wird.

Bei den Messungen mit der Anordnung der Fig. 1 ergab sich, daß die Zahl der Dreifachkoinzidenzen, d. h. die Zahl der ausgelösten Sekundärstrahlen mit wachsender Dicke des über den Zählrohren liegenden Mediums zu einem Maximum anstieg, um bei dickeren Schichten wieder abzufallen.

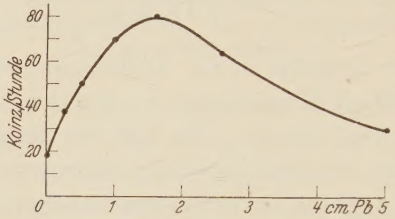

Fig. 2. Sättigungskurve an Blei.

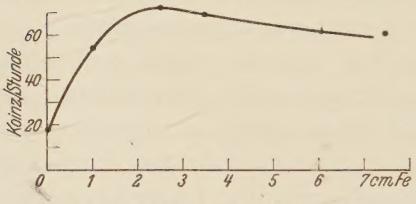

Fig. 3. Sättigungskurve an Eisen.

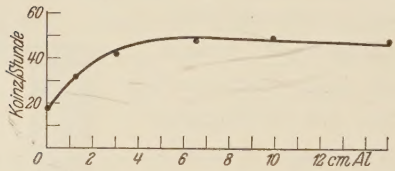

Fig. 4. Sättigungskurve an Aluminium.

Etwa vorhandene sonnenzeitliche Schwankungen der Ultrastrahlung wurden durch geeignete zeitliche Verteilung der Messungen ausgeschaltet. Ein seitlicher Bleipanzer sorgte dafür, daß die zufälligen Koinzidenzen möglichst herabgedrückt wurden. Später hat sich allerdings herausgestellt, daß auch dieser Seitenpanzer einen erheblichen Beitrag zu den beobachteten Dreifachkoinzidenzen liefert (s. § 5). Tabelle 1 gibt ein Beispiel einer solchen Meßreihe an Blei. Für jeden Meßpunkt ist die Summe aller Einzelmessungen nach Abzug der zufälligen Koinzidenzen eingetragen. Diese Einzelmessungen

waren über die verschiedenen Tages- und Nachtzeiten verteilt und stimmten innerhalb des statistischen Fehlers miteinander überein. Die Fig. 2, 3 und 4 zeigen die Sättigungskurven an Blei, Eisen und Aluminium. Die zufälligen Koinzidenzen sind bei allen Kurven schon abgezogen. Insgesamt wurden für die Bleikurve in 140 Stunden 6596 systematische Koinzidenzen gezählt. Unter entsprechenden Verhältnissen sind auch die Kurven an Eisen und Aluminium gewonnen.

Tabelle 1.
Sättigungskurve an Blei.

Pb-Schicht in cm	0	0,25	0,5	1,0	1,6	2,8	5,0
Gesamte Koinzidenzzahl . .	435	687	1191	1540	1004	1027	712
Gesamte Beobachtungszeit in Stunden	24	18	24	22	12	16	24
Mittlere Koinzidenzzahl pro Stunde	18	38	50	70	84	64	30

Nachdem die Messungen bis zu diesem Punkt fortgeschritten waren, erschien eine Arbeit von Rossi[1]), der mit einer ähnlichen Koinzidenzanordnung dreier Zählrohre Messungen an Blei und Eisen vorgenommen hat. Diese Messungen stimmen, soweit ein Vergleich möglich ist, mit den meinen überein.

§ 4. Diskussion der Sättigungskurven. Ganz allgemein sind die Kurven der Fig. 2, 3 und 4 so zu verstehen, daß die in dem durchsetzten Medium ausgelöste Sekundärstrahlung mit wachsender Schichtdicke dem Anstieg der Kurven entsprechend zunimmt und bei einer bestimmten Dicke, der Sättigungsdicke, ihren maximalen Wert erreicht. Der dann bei noch dickeren Schichten auftretende Abfall der Kurven muß als Absorption der primären erregenden Strahlung in dem betreffenden Material gedeutet werden.

In den vorliegenden Fällen lagen die Sättigungsdicken in Blei bei etwa 1,6 cm, in Eisen bei etwa 2,5 cm und in Aluminium bei etwa 7 cm. Alle drei Werte entsprechen in guter Übereinstimmung einer Wasserschicht von rund 18 cm Dicke. Die Intensität der Sekundärstrahlung bei der Sättigungsdicke ist für die drei Materialien verschieden, und zwar werden

[1]) B. Rossi, Rend. Lincei **15**, 734, 1932; Anmerkung bei der Korrektur: Inzwischen hat Rossi seine Versuche ausführlich in dieser Zeitschrift (**82**, 151, 1933) veröffentlicht. Soweit die Ergebnisse mit den hier behandelten Fragen verglichen werden können, besteht Übereinstimmung.

in schweren Medien mehr Sekundärstrahlen ausgelöst als in leichten. Das Verhältnis der Intensitäten für Blei, Eisen und Aluminium ist etwa 1 : 0,8 : 0,5.

Aus dem Anstieg der Kurven kann näherungsweise der Absorptionskoeffizient der sekundären Strahlung berechnet werden[1]). Dabei ist zu berücksichtigen, daß in den Kurven noch die sekundäre Strahlung der Luft und der Zählrohrwandungen enthalten ist. Es wurden deshalb die gemessenen Kurven auf die Schichtdicke Null extrapoliert und dann diejenige Schichtdicke bestimmt, bei der gerade der halbe Wert der maximalen Sekundärintensität erreicht ist (Halbwertsdicke). Aus der Halbwertsdicke D ist der Absorptionskoeffizient μ der Sekundärstrahlung in dem Medium, in dem sie ausgelöst wurde, nach der einfachen Beziehung

$$\mu \cdot D = \ln 2$$

berechnet und in Tabelle 2 eingetragen. Der Fehler, mit dem die Absorptionskoeffizienten behaftet sind, kann auf etwa $\pm 25\%$ geschätzt werden.

Tabelle 2.

Sättigungsdicke und Absorptionskoeffizient der Sekundärstrahlung für verschiedene Materialien.

Material	Sättigungsdicke	Halbwertsdicke	Absorptionskoeffizient	Massenabsorptionskoeffizient
Blei	1,6 cm	0,45 cm	1,53 cm^{-1} Pb	0,13 cm^2/g
Eisen	2,5 cm	0,6 cm	1,15 cm^{-1} Fe	0,15 cm^2/g
Aluminium	7,0 cm	1,8 cm	0,38 cm^{-1} Al	0,14 cm^2/g

Die gut übereinstimmenden Werte der Massenabsorptionskoeffizienten für die drei untersuchten Materialien scheinen darauf hinzudeuten, daß bei verschiedenen Absorbern wesentliche Unterschiede zwar in der Zahl, aber nicht in der Härte der Sekundärstrahlen bestehen. Im selben Sinne spricht auch ein Versuch, bei dem die Absorption der Sekundärstrahlen aus Blei in Aluminium untersucht wurde. Es zeigte sich dabei, daß eine Schicht von etwa 6,5 cm Aluminium die sekundäre Strahlung aus Blei praktisch vollkommen absorbierte.

Johnson[2]) hat aus den Messungen von Schindler[3]) ebenfalls Absorptionskoeffizienten der Sekundärstrahlung aus verschiedenen Materialien berechnet. Er findet z. B. für Sekundärstrahlen aus Blei, absorbiert

[1]) Siehe z. B. Handb. d. Exp.-Phys. **15**, 142, 1928.
[2]) Th. H. Johnson, Phys. Rev. **41**, 545, 1932.
[3]) H. Schindler, ZS. f. Phys. **72**, 625, 1931.

in Blei, einen Massenabsorptionskoeffizienten von 0,086 cm^2/g, für Sekundärstrahlen aus Eisen, absorbiert in Eisen, einen solchen von 0,039 cm^2/g. Diese Werte weichen erheblich von meinen Werten ab. Es ist dies aber kaum verwunderlich, wenn man bedenkt, daß bei den Schindlerschen Ionisationsmessungen alle im Absorber entstehenden Sekundärstrahlen mitgemessen werden, während bei den vorliegenden Versuchen nur Gruppen von Sekundärstrahlen (Koinzidenzen) registriert werden (s. § 3). Man weiß aus Untersuchungen von Skobelzyn[1]), Anderson[2]) u. a., daß solche Gruppen viel weniger häufig auftreten als einfache Korpuskeln und also zu Messungen mit der Ionisationskammer nur einen relativ kleinen Beitrag liefern.

Der Abfall der Kurven bei Schichtdicken, die größer sind als die Sättigungsdicke, ist jedenfalls bei Blei viel größer als man erwarten würde, wenn man den aus Koinzidenzmessungen bekannten Absorptionskoeffizienten[3])[4]) der Ultrastrahlung zugrundelegt. Es liegt somit die Vermutung nahe, daß als erregende Primärstrahlung der hier gemessenen Sekundärstrahlung im wesentlichen eine weiche Komponente der Ultrastrahlung in Betracht kommt. Dafür spricht auch die Tatsache, daß, wie in § 5 erläutert wird, die auslösende Strahlung hauptsächlich aus der Vertikalrichtung kommt.

§ 5. Der Einfluß des Bleiseitenpanzers. Bei Durchführung der eben beschriebenen Messungen zeigte sich, daß nach Entfernung des Seitenpanzers aus Blei die Zahl der gemessenen Dreifachkoinzidenzen erheblich absank, ein Beweis dafür, daß der seitliche Panzer ebenfalls einen Beitrag zu der beobachteten Sekundärstrahlung liefert. Von besonderer Bedeutung ist nun, daß der Betrag der seitlichen Streustrahlung stark von der Dicke der über den Zählrohren liegenden Bleischicht abhängt. Um diese Abhängigkeit klarzulegen, wurde die Bleikurve mit der Anordnung der Fig. 1 nochmals durchgemessen, und zwar sowohl mit als auch ohne einen seitlichen Bleipanzer von 5 cm Dicke. Kurve 1 in Fig. 5 ist mit Seitenpanzer, Kurve 2 ohne Seitenpanzer gewonnen. Die Differenzkurve 3 zeigt direkt die Abhängigkeit der sekundären Strahlung des Seitenpanzers von der Dicke der Bleischicht über den Zählrohren und gleicht in ihrem Verlauf wesentlich den Kurven 1 und 2. Insgesamt wurden für diese Kurven in 175 Stunden etwa 9700 Koinzidenzen gezählt.

---

[1]) D. Skobelzyn, ebenda **54**, 686, 1929.
[2]) C. D. Anderson, Phys. Rev. **41**, 405, 1932.
[3]) W. Bothe u. W. Kolhörster, ZS. f. Phys. **56**, 751, 1929.
[4]) B. Rossi, ebenda **68**, 64, 1931.

Eine weitere Frage von Bedeutung war die Abhängigkeit der Koinzidenzzahl von der Dicke des Seitenpanzers. Bei der Kurve der Fig. 6 blieb die Dicke der Bleischicht über den Zählrohren unverändert gleich 1,6 cm, während die Dicke des Pb-Seitenpanzers variiert wurde. Ohne Seitenwand ergibt sich eine bestimmte Zahl von Koinzidenzen, die von der Sekundärstrahlung der oberen Bleischicht herrührt. Nach Einschalten einer dünnen Seitenwand steigt die Koinzidenzzahl an, erreicht aber schon

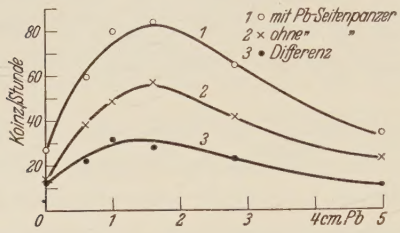

Fig. 5. Einfluß des Pb-Seitenpanzers.

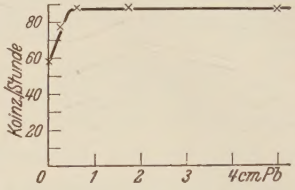

Fig. 6. Abhängigkeit der Streustrahlung des Seitenpanzers von der Schichtdicke.

bei einer Dicke der Seitenwand von 0,6 cm einen maximalen Wert, der bei weiterer Verstärkung des Seitenpanzers unverändert bestehen bleibt.

Die starke Abhängigkeit der seitlichen Streustrahlung von der über den Zählrohren liegenden Bleischicht und die Tatsache, daß der maximale seitliche Effekt schon bei einer Dicke des Seitenpanzers von 0,6 cm auftritt, machen es wahrscheinlich, daß wir hier einen Teil der in der oberen Bleischicht entstandenen Sekundärteilchen wiederfinden, die in die Seitenwand eingedrungen und dort so stark gestreut worden sind, daß sie die Zählrohre durchsetzen können.

Aus der Kurve der Fig. 6 kann noch die weitere Folgerung gezogen werden, daß die Auslösung der beobachteten Sekundärstrahlung einer Komponente der Ultrastrahlung zugeschrieben werden muß, die vorzugsweise in der Vertikalrichtung einfällt. Denn sonst müßte ein merklicher Teil des beobachteten seitlichen Effektes dadurch zustande kommen, daß eine von außen auffallende Strahlung Sekundärstrahlen durch die Zählrohre schickt. Dann müßte aber die Kurve ähnlich verlaufen wie die Sättigungskurven und bei Schichten, die größer als 1,6 cm sind, einen Abfall zeigen.

Es lag nahe, in diesem Zusammenhang zu untersuchen, ob auch eine Bleischicht, die unterhalb des Zählrohrdreiecks liegt, zusätzliche Dreifachkoinzidenzen hervorruft. Hierzu wurde eine etwas gedrängtere Anordnung der Zählrohre (Fig. 7) benutzt.

Es wurden zwei Meßreihen ausgeführt: bei der einen befand sich über den Zählrohren kein Panzer, während unter dieselben wachsende Schichten von Blei gebracht wurden, bei der anderen lag ständig eine Schicht von 1,6 cm Blei über den Zählrohren, während die untere Bleischicht wiederum variiert wurde.

Fig. 8 zeigt das Ergebnis dieser Messungen. Als Abszisse der Kurven ist aufgetragen die Dicke der untenliegenden Bleischicht, als Ordinate

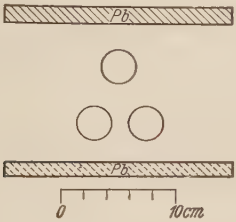

Fig. 7. Anordnung zum Nachweis der Rückwärtsstreuung.

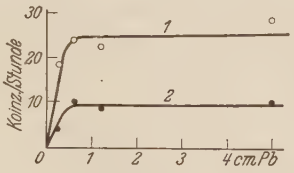

Fig. 8. Abhängigkeit der Rückwärtsstreuung von der Schichtdicke.
Kurve 1: 1,6 cm Pb über den Zählrohren.
Kurve 2: ohne Pb über den Zählrohren.

die Zahl der Dreifachkoinzidenzen, um welche die ursprüngliche Koinzidenzzahl nach Einschalten der unteren Bleischichten erhöht wurde. Beide Kurven zeigen, daß das Einschalten von Bleischichten unterhalb der Zählrohre eine Erhöhung der Koinzidenzzahl bewirkt, die, ähnlich wie bei der Streuung im seitlichen Panzer, bei einer Schichtdicke von etwa 0,6 cm einen höchsten Wert erreicht. Von Bedeutung ist, daß auch hier eine Bleischicht von 1,6 cm Dicke über den Rohren den Effekt bedeutend vergrößert. Wir müssen also annehmen, daß, ebenso wie im Seitenpanzer, eine Streuung von Sekundärteilchen in der unteren Schicht stattfindet, diesmal sogar um noch größere Winkel. Demgemäß ist auch die Zahl der gestreuten Teilchen erheblich kleiner.

§ 6. Verhalten der Sekundärstrahlung im Übergangsgebiet Aluminium—Blei. Die Sättigungskurven in § 3 haben gezeigt, daß die Ultrastrahlung in schweren Medien Sekundärstrahlen häufiger auslöst als in leichten. Es war deshalb zu erwarten, daß bei Aufnahme einer Absorptionskurve dann Unstetigkeiten auftreten, wenn die Ordnungszahl des Absorptionsmaterials sich ändert. Um über den Verlauf einer solchen Übergangskurve Aufschluß zu erhalten, wurde so vorgegangen, daß mit der Anordnung der Fig. 1, jedoch ohne seitlichen Panzer, zuerst eine Sättigungskurve an Aluminium aufgenommen wurde. Dann wurde von einer bestimmten Dicke des Aluminiums ab (10 cm) die Schicht weiter durch Blei vergrößert, so daß die Ultrastrahlung zuerst eine 10 cm dicke Schicht von Aluminium und dann eine Bleischicht wachsender Dicke zu durchdringen hatte.

Die Kurve in Fig. 9 zeigt das Meßergebnis. Als Ordinate ist aufgetragen die Zahl der Dreifachkoinzidenzen pro Stunde, als Abszisse das Wasseräquivalent der über den Zählrohren liegenden Schichten. Die reine Aluminiumkurve erreicht bei etwa 18 cm Wasseräquivalent einen Sättigungswert, schaltet man aber nach 10 cm Aluminium dünne Bleischichten ein, so wächst die Zahl der aus der Schicht austretenden Sekundärstrahlen erheblich an. Bei einer Pb-Schicht von etwa 1 cm wird ein Maximum erreicht. Von da ab fällt die Sekundärintensität wieder stark ab. Man sieht also, daß in der Tat die größere Sekundärstrahlung aus Blei aufs deutlichste hervortritt. In 181 Stunden wurden für diese Kurve 5540 Koinzidenzen gezählt.

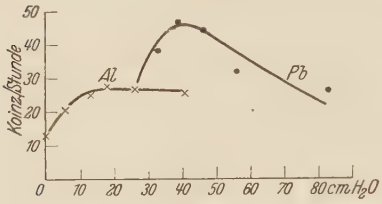

Fig. 9.
Übergangskurve Aluminium—Blei.

Sehr interessante Übergangseffekte sind bekanntlich bereits von Steinke[1]) und Schindler[2]) beobachtet und quantitativ verfolgt worden. Die Verschiedenheit der Meßmethoden läßt jedoch vorerst einen Vergleich der Ergebnisse nicht zu.

§ 7. Nachweis und Häufigkeit von Sekundärstrahlenbüscheln. Die vorangegangenen Versuche ließen vermuten, daß bei einem Teil der beobachteten Sekundärprozesse gleichzeitig mehrere Sekundärteilchen ausgelöst werden. Aufnahmen mit der Wilsonkammer von Skobelzyn[3]), Anderson[4]), Blackett und Occhialini[5]) u. a. haben schon früher das Auftreten solcher Gruppen von Sekundärstrahlen erwiesen. Es erschien daher aussichtsreich, zu versuchen, diese Sekundärstrahlenbüschel auch durch Koinzidenzen nachzuweisen und ihre Häufigkeit zu untersuchen. Dazu wurde die Anordnung der Fig. 10 verwendet.

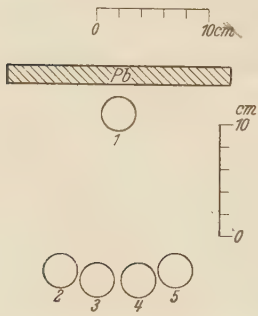

Fig. 10.
Fünffach-Koinzidenzanordnung zum Nachweis von Sekundärstrahlenbüscheln.

[1]) E. Steinke, ZS. f. Phys. **48**, 647, 1928.
[2]) H. Schindler, ebenda **72**, 625, 1931.
[3]) D. Skobelzyn, ebenda **54**, 686, 1929.
[4]) C. D. Anderson, Phys. Rev. **41**, 405, 1932.
[5]) P. M. S. Blackett u. G. P. S. Occhialini, Proc. Roy. Soc. London (A) **139**, 699, 1933.

Sie besteht aus fünf Zählrohren der in § 2 beschriebenen Art, deren Fünffachkoinzidenzen gemessen wurden. Gleichzeitig wurden noch die Dreifachkoinzidenzen der Rohre 1, 3 und 4 registriert, um einen Vergleich der Drei- und Fünffachkoinzidenzen zu ermöglichen. Gemessen wurde abwechselnd ohne bzw. mit Bleischichten von 1,5 und 5 cm Dicke über den Zählrohren.

Fünffachkoinzidenzen sind bei dieser Anordnung der Zählrohre offenbar nur dann möglich, wenn aus dem Blei gleichzeitig vier korpuskulare Strahlen, die die einzelnen Zählrohre durchsetzen, austreten, etwa ein Primärstrahl und drei seiner Sekundärstrahlen oder vier Sekundärstrahlen. Mit dieser Anordnung wurden nun in der Tat Fünffachkoinzidenzen erhalten, ein Beweis dafür, daß durch die Ultrastrahlung aus Blei gleichzeitig mehrere Sekundärteilchen nach verschiedenen Richtungen ausgelöst werden. Die Ergebnisse sind in Fig. 11 veranschaulicht. Kurve 1 zeigt die Dreifachkoinzidenzen der Zählrohre 1, 3 und 4, Kurve 2 die Fünffachkoinzidenzen aller Zählrohre in Abhängigkeit von der darüberliegenden Bleischicht. Die Ordinate der Kurve 2 ist gegenüber derjenigen der Kurve 1 um das Fünffache vergrößert.

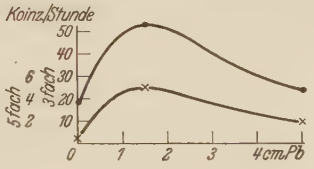

Fig. 11.
Abhängigkeit der Zahl der Sekundärstrahlengruppen von der Schichtdicke. Obere Kurve: Dreifachkoinzidenzen. Untere Kurve: Fünffachkoinzidenzen.

Ein Vergleich der beiden Kurven zeigt, daß Drei- und Fünffachkoinzidenzen in derselben Weise von der Dicke der über den Zählrohren liegenden Bleischicht abhängen. Es schien nun wertvoll, über die relative Häufigkeit der Sekundärprozesse, die in dem durch die Zählrohranordnung gegebenen Raumwinkel Drei- bzw. Vier- bzw. Fünffachkoinzidenzen erzeugen, eine Aussage zu machen. In der Tabelle 3 ist daher in der ersten Spalte die Koinzidenzsumme 12 + 13 + 14 + 15 eingetragen, wobei unter 12, 13 usw. die Zahl der Koinzidenzen von Zählrohr 1 mit Zählrohr 2, Zählrohr 3 usw. zu verstehen ist. Spalte 2 enthält die Summe der Dreifachkoinzidenzen 123 + 134 + 145 + 124 + 135 + 125 und entsprechendes gilt für Spalte 3 und 4. Symmetrische Koinzidenzen wie z. B. 1234 und 1345 sind nur einmal gemessen. Die Koinzidenzen 12, 13 usw. sind ohne, alle übrigen Koinzidenzen mit einer Bleischicht von 1,5 cm über den Zählrohren gemessen. Dabei sind von den Drei- bzw. Vierfachkoinzidenzen diejenigen Koinzidenzen abgezogen, die gleichzeitig eine Vier- bzw. eine Fünffachkoinzidenz erzeugen.

Tabelle 3.

Häufigkeit von Sekundärstrahlengruppen.

Koinzidenzsummen	12 + 13 + 14 + 15	123 + 134 + 145 + 124 + 135 + 125	1234 + 1345 + 1235 + 1245	12345
Mindestzahl der gleichzeitig auftretenden Strahlen .	1	2	3	4
Gemessene Koinzidenzzahl .	3188	3554	(85)	125
Mittlere Koinzidenzzahl pro Stunde	800	231	(35)	5
Relative Koinzidenzzahl . .	100	29	(4,5)	0,6

Aus Zeile 4 der Tabelle 3 ersieht man, daß auf 100 einfache Strahlen aus 1,5 cm Blei 29 Doppelbahnen, 4,5 Dreifachbahnen und 0,6 Vierfachbahnen entfallen. Diese Strahlenstatistik kann selbstverständlich nur als erste Näherung gelten, zumal ja auch dabei angenommen ist, daß jedes Zählrohr nur von einem Strahl einer Sekundärstrahlengruppe getroffen wird. Auch ist der Raumwinkel, für den die Statistik gilt, nur näherungsweise anzugeben und etwa auf Strahlrichtungen von 0 bis 50^0 um die Vertikale beschränkt. In den am Anfang dieses Paragraphen zitierten Untersuchungen mit der Wilsonkammer sind ebenfalls Angaben über die Häufigkeit von Sekundärstrahlengruppen gemacht. Ein genauer Vergleich ist jedoch nicht durchführbar, da die dort verwendeten Meßanordnungen erheblich von der hier benutzten Anordnung abweichen. Immerhin läßt sich sagen, daß größenordnungsmäßig Übereinstimmung besteht.

§ 8. Zusammenfassung. Die von der kosmischen Ultrastrahlung in Blei, Eisen und Aluminium ausgelöste Sekundärstrahlung besitzt eine Reichweite von rund 18 cm in Wasser und einen Massenabsorptionskoeffizienten von etwa 0,14 cm^2/g. Die Intensitäten der Sekundärstrahlung aus Blei, Eisen und Aluminium bei der Sättigungsdicke verhalten sich wie 1 : 0,8 : 0,5. Geht man bei Aufnahme einer Absorptionskurve von Aluminium zu Blei über, so prägt sich die größere Sekundärstrahlung aus Blei in der Kurve aufs deutlichste aus (Kurve 9).

Auch durch seitlich und unter den Zählrohren aufgestellte Bleiplatten wird die Zahl der Dreifachkoinzidenzen erhöht. Dies wird als Streuung der Sekundärstrahlen in diesen Metallen gedeutet.

Mittels einer Fünffach-Koinzidenzanordnung wird das Auftreten von Sekundärstrahlengruppen erwiesen und ihre Häufigkeit untersucht (Tabelle 3).

Die vorliegende Arbeit wurde im Physikalischen Institut der Universität Tübingen ausgeführt.

Herrn Prof. Dr. H. Geiger, der die Anregung zu dieser Arbeit gab, möchte ich auch an dieser Stelle für seine wertvollen Ratschläge und seine fördernde Anteilnahme herzlichst danken. Für mannigfache Beratung bin ich auch Herrn Dr. H. Fesefeldt zu Dank verpflichtet.

Tübingen, im März 1933.

Lebenslauf.

Am 27. Juli 1911 wurde ich, Erwin Fünfer, deutscher Reichsangehöriger, als Sohn des Oberrechnungsrats Eugen Fünfer in Heidenheim an der Brenz geboren. Ich besuchte die Realgymnasien in Heidenheim und Schwäb. Hall sowie das Gymnasium zu Tübingen, wo ich im Frühjahr 1929 die Reifeprüfung ablegte. Hierauf studierte ich an den Universitäten Tübingen und Berlin Physik und Mathematik.